

# 基于多进制小波的多源遥感影像融合

王洪华 王双亭

杜春萍

(信息工程大学测绘学院, 郑州 450052) (大连黑石礁 65015 部队, 大连 116015)

**摘要** 首先介绍了遥感影像融合的一般理论和方法, 然后在讨论多进制小波理论和影像特征的基础上, 提出了一种基于特征的多进制小波变换的影像融合算法, 该算法根据待融合影像分辨率之比来确定采用几进制小波, 将待融合的高分辨率影像进行多进制小波变换, 然后把高分影像经小波变换后获得的低频成分和低分辨率影像依据一定的关系进行相互替换, 以形成新的高分辨影像的低频成分, 经过多进制小波逆变换获得融合后的影像. 最大限度地利用了待融合影像的信息, 防止了影像信息的丢失. 通过对具体影像的实验证明, 融合后的影像最大限度地保留了待融合影像的光谱信息, 同时提高了待融合影像的清晰度和空间分辨率. 给出了 SPOT 全色影像与 SPOT 多光谱影像, SPOT 全色影像与 TM 影像的融合结果, 并与其他方法进行了比较, 从而证明了本方法的优越性和自适应能力.

**关键字** 多进制小波 影像配准 影像融合

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)04-0341-05

## The Fusion of Remote Sense Images by the Multi-Band Wavelet Based on Image Feature

WANG Hong-hua, WANG Shuang-ting

(Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450052)

DU Chun-ping

(The NO. 65015 PLA Dalian 116015)

**Abstract** This paper introduces the theory and method for remote-sensing images fusion. Based on the multi-band wavelet theory, a scheme of remote-sensing images fusion based on image feature is made in this paper. In this algorithm the number of bands for wavelet transform is decided on the resolution ratio among remote-sensing images, high resolution image to be fused can receive the low frequency ingredient by the multi-band wavelet transform. By displacing the low frequency ingredient and the low resolution images with each other according to some relations, the new low frequency ingredient of high resolution image is formed. Then the fusion image through the inverse multi-band wavelet transform can be obtained. This scheme makes best use of the information on remote-sensing images to be fused and prevents the loss of image information. This method is experimented by using material images. In the proposed method all the spectral characteristics have been preserved, and the definition and the spatial quality of image have been improved. Experimental results including the fusion of SPOT panchromatic image and SPOT multi-spectral images, SPOT panchromatic image and Landsat(TM) images are presented. Compared with other methods, the proposed scheme is much better and it possesses more adaptability.

**Keywords** Multi-band wavelet, Image registration, Image fusion

## 0 前言

当代航天遥感系统已经能够为用户提供高空间

分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率的海量影像数据, 但是, 由于每一种影像数据都有其固有的特点和特定的应用领域, 因此如何充分融合来自各种类型的遥感影像信息, 以克服遥感影像自动解译中单一

信息源的不足, 已经成为一个迫切需要解决的问题, 它直接影响到大量遥感数据的使用效益. 因此, 遥感影像融合已成为海量遥感影像数据处理和极富使用的瓶颈问题.

遥感影像融合是一种通过高级影像处理技术来复合多源遥感影像的技术, 它最大程度地利用了多种数据的不同特性, 使图象同时具有较高的光谱和空间分辨率, 从而提高了图象的视觉效果, 也提高了图象特征识别的精度和分类精度. 遥感影像融合是近几年国际遥感界研究的热点, 文献[1]中采用了将 SPOT 多光谱数据经彩色变换后的强度(I)用其全色波段影像来替代的融合方法, 然而, 由于不同频道数据的不同光谱特性曲线, IHS 方法扭曲了原始的光谱特性, 产生了光谱退化现象; 文献[2]中将主分量分析应用于影像融合处理, 采用由另一传感器获得的遥感影像替代多频道遥感影像经主分量变换后的第一主分量 PC1 来进行融合处理, 以提高多频道影像(如 TM 多光谱影像)的空间分辨率, 并且可以拉伸第一主分量的方差和均值; 文献[3]证实了主分量替换法会失去其原有的物理特性; 采用高通滤波 (HPF) 方法进行融合, 即首先采用高通滤波器对高空间分辨率影像进行滤波, 然后将滤波得到的结果依像元加到多光谱影像数据(低分辨率)中<sup>[2]</sup>, 此方法虽然有效地保留了原多光谱信息, 但在对高分辨率影像滤波时, 却滤掉了大部分的纹理信息. 近年来, 随着将小波变换引入图象处理领域, 基于小波变换的影像融合方法引起了人们的高度重视. 基于二进制和三进制小波的 SPOT 全色影像和多光谱影像的融合<sup>[4,5]</sup>, 由于其只是简单的用高分辨率的遥感影像替换低分辨率影像经过小波分解后的低频分量, 却没有考虑影像特征方面的损失; 基于特征的二进制小波影像融合<sup>[6]</sup>, 由于没有考虑到待融合影像的分辨率, 从而融合效果并不是很好. 在深入研究小波变换融合方法的基础上, 提出了一种新的融合方法——基于特征的多进制小波融合. 给出了 SPOT 影像与 TM5 影像以及 SPOT 全色影像和 SPOT 多光谱影像的融合结果, 并与其他融合方法进行了比较.

### 1 多进制小波变换

多进制小波是近年发展起来的小波理论的一个重要分支, 它在对称性、光滑性、紧致性等方面都优

于二进制小波, 能够解决许多二进制小波不能解决的问题.

#### 1.1 多进制小波的多尺度分析

设  $M \geq 2$  是一个正整数, 若  $L^2(\mathbf{R})$  中有闭子空间序列  $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$  满足下列条件:

- (1) 单调性:  $V_j \subset V_{j-1}$ ;
- (2) 逼近性:  $\bigcap V_j = \{0\}, \overline{\bigcup V_j} = L^2(\mathbf{R})$ ;
- (3) 伸缩性  $u(x) \in V_j \Leftrightarrow u(Mx) \in V_{j-1}, \forall j \in \mathbf{Z}$ ;
- (4) Riesz 基: 存在  $g \in V_0$ , 使得  $\{g(x-k) \mid k \in \mathbf{Z}\}$  构成  $V_0$  的 Riesz 基. 即对任何  $u \in V_0$ , 存在唯一序列

$\{a_k\} \in L^2(\mathbf{R})$ , 使得  $u(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} a_k g(x-k)$ ; 反之, 任何序列  $\{a_k\} \in L^2(\mathbf{R})$ , 确定一函数  $u \in V_0$ , 且存在函数  $A, B$ , 使得  $A \|u\|^2 \leq \sum_{k \in \mathbf{Z}} |a_k|^2 \leq B \|u\|^2$  对所有  $u \in V_0$  成立. 则称  $\{V_j\}_{j \in \mathbf{Z}}$  为一个  $M$  进制的多尺度分析.

利用多尺度分析可以得到空间  $L^2(\mathbf{R})$  的正交分解. 令  $W_j$  为  $V_j$  的正交补空间, 即

$$V_j \oplus W_j = V_{j-1}, \quad j \in \mathbf{Z}$$

则有:

$$L^2(\mathbf{R}) = \bigoplus_{j=-\infty}^{\infty} W_j = V_k + \bigoplus_{j \geq k} W_j$$

即对每一个  $f \in L^2(\mathbf{R})$ , 存在  $g_j \in W_j$  和  $f_k \in V_k$ , 使得

$$f = \sum_{j \in \mathbf{Z}} g_j = f_k + \sum_{j \geq k} g_j$$

事实上,  $V_j$  由  $\{M^{j/2} \varphi(M^j x - k) \mid k \in \mathbf{Z}\}$  生成,  $W_j$  由  $\{M^{j/2} \psi_s(M^j x - k) \mid 1 \leq s \leq M-1, k \in \mathbf{Z}\}$  生成. 其中,  $\varphi(x)$  为尺度函数,  $\{\psi_s(x), 1 \leq s \leq M-1\}$  是基本小波函数. 当  $M=2$  时, 基本小波函数只有一个, 它可由  $\varphi$  明确地表示, 但当  $M > 2$  时, 基本小波函数有  $M-1$  个, 不能用  $\varphi$  简单表示. 从多尺度分析的定义知尺度函数满足一个尺度方程:

$$\varphi(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_k \varphi(Mx - k)$$

定义尺度方程的共轭滤波器为:

$$H(z) = \frac{1}{M} \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_k z^k$$

$H(z)$  即为 Daubechies 型标准正交尺度函数  $\varphi(x)$  的共轭滤波器. 文献[7]给出的共轭滤波器函数形式为:

$$H(z) = \left| \frac{1-z^M}{M^{3/2}(1-z)} \right|^2 \left| \frac{1+\theta}{2} + \frac{1-\theta}{2} z \right|$$

其中,  $\theta = \sqrt{\frac{2M^2+1}{3}}$ ,  $M$  为进制.

利用上式, 可以计算当  $M$  为不同进制时尺度函

数对应的共轭滤波系数  $c_i$ , 如表 1 所示.

表 1 多进制小波的共轭滤波系数

	$M=3$	$M=4$	$M=5$	$M=6$
$c_0$	0.195 367 30	0.134 894 52	0.102 462 11	0.082 401 15
$c_1$	0.306 477 77	0.197 394 52	0.142 462 11	0.110 178 93
$c_2$	0.417 588 88	0.259 894 52	0.182 462 11	0.137 956 71
$c_3$	0.137 966 66	0.322 394 52	0.222 462 11	0.165 734 48
$c_4$	0.026 855 55	0.115 105 47	0.262 462 11	0.193 512 27
$c_5$	-0.084 256 19	0.052 605 40	0.097 537 89	0.221 290 04
$c_6$		-0.009 894 52	0.057 537 89	0.084 265 52
$c_7$		-0.072 394 52	0.017 537 89	0.056 487 74
$c_8$			-0.022 462 11	0.028 709 96
$c_9$			-0.062 462 11	0.000 932 18
$c_{10}$				-0.026 845 59
$c_{11}$				-0.054 623 37

### 1.2 二维图象多进制小波的分解和重构

二维图象为一有限能量函数  $f(x, y) \in L^2(\mathbf{R})$ . 利用一维小波, 可以构造出二维张量积小波. 可以证明, 若  $\mathcal{Q}_x$  生成一个  $L^2(\mathbf{R})$  上的多尺度分析, 则  $\mathcal{Q}_x, \mathcal{Q}_y = \mathcal{Q}_x \mathcal{Q}_y$  生成  $L^2(\mathbf{R})$  上的多尺度分析, 有  $M^2 - 1$  个小波函数  $\Psi^{s_1, s_2}$

$$\Psi^{s_1, s_2} = \begin{cases} \mathcal{Q}_x \Psi^2(y) & s_1 = 0, 1 \leq s_2 \leq M - 1 \\ \Psi^1(x) \mathcal{Q}_y & 1 \leq s_1 \leq M - 1, s_2 = 0 \\ \Psi^1(x) \Psi^2(y) & 1 \leq s_1, s_2 \leq M - 1 \end{cases}$$

可得二维图象的多进制小波分解式

$$f_{j+1} = f_j + g_j = f_j + \sum_{s_1, s_2=0, s_1+s_2 \neq 0}^{M-1} g_i^{s_1, s_2}$$

这里

$$g_j^{s_1, s_2} = \begin{cases} \sum_k \sum_l b_{j,k,l}^{0, s_2} \mathcal{Q}_{j,k}(x) \Psi_{j,l}^2(y) & \text{当 } s_1 = 0, 1 \leq s_2 \leq M - 1 \text{ 时} \\ \sum_k \sum_l b_{j,k,l}^{s_1, 0} \Psi_{j,k}^1(x) \mathcal{Q}_{j,l}(y) & \text{当 } 1 \leq s_1 \leq M - 1, s_2 = 0 \text{ 时} \\ \sum_k \sum_l b_{j,k,l}^{s_1, s_2} \Psi_{j,k}^1(x) \Psi_{j,l}^2(y) & \text{当 } 1 \leq s_1, s_2 \leq M - 1 \text{ 时} \end{cases}$$

其中

$$a_{j,k,l} = \sum_{n_1} \sum_{n_2} c_{n_1 - Mk} c_{n_2 - Ml} a_{j+1, n_1, n_2}$$

$$b_{j,k,l}^{s_1, s_2} = \begin{cases} \sum_{n_1} \sum_{n_2} c_{n_1 - Mk} d_{n_2 - Ml}^{s_2} a_{j+1, n_1, n_2} & \text{当 } s_1 = 0, 1 \leq s_2 \leq M - 1 \text{ 时} \\ \sum_{n_1} \sum_{n_2} d_{n_1 - Ml}^{s_1} c_{n_2 - Mk} a_{j+1, n_1, n_2} & \text{当 } 1 \leq s_1 \leq M - 1, s_2 = 0 \text{ 时} \\ \sum_{n_1} \sum_{n_2} d_{n_1 - Mk}^{s_1} d_{n_2 - Ml}^{s_2} a_{j+1, n_1, n_2} & \text{当 } 1 \leq s_1, s_2 \leq M - 1 \text{ 时} \end{cases}$$

图象的重构公式为

$$\begin{aligned} a_{j+1, k, l} &= \sum_{n_1} \sum_{n_2} c_{k - Mn_1} c_{l - Mn_2} a_{j, k, l} + \\ &\sum_{s_1, s_2=0, s_1+s_2 \neq 0}^{M-1} \sum_{n_1} \sum_{n_2} d_{k - Mn_1}^{s_1} d_{l - Mn_2}^{s_2} b_{j, k, l}^{s_1, s_2} \\ &= \sum_{n_1} \sum_{n_2} (c_{k - Mn_1} c_{l - Mn_2} a_{j, k, l} + \\ &\sum_{s_1, s_2=0, s_1+s_2 \neq 0}^{M-1} d_{k - Mn_1}^{s_1} d_{l - Mn_2}^{s_2} b_{j, k, l}^{s_1, s_2}) \end{aligned}$$

式中,  $d_i^0 = c_i^0$ . 系数  $c_i$  从表 1 中选择.

## 2 基于特征的多进制小波变换遥感影像融合方法

由于受到待融合影像分辨率的影响, 二进制小波只能较好地融合分辨率之比为 1: 2 的影像, 而对分辨率之比为 1: 3, 或者其他分辨率之比的影像就不能较好地融合. 在充分考虑到待融合影像的分辨率之比以及各自的特征信息后, 提出了以下的融合算法:

设两幅待融合影像的分辨率之比为  $W$ , 则:

(1) 将待融合影像精确配准 影像配准是融合的基础, 配准精度高, 才能使待融合影像的像元灰度值高度相关, 融合后影像才有实际的物理意义. 影像配准过程一般分为像元空间位置变换和像元重采样两个基本步骤. 本文采用了以直线为控制基础的配准方法, 具体方法请参见文献[8].

(2) 将待融合的高分辨率影像通过高通滤波器进行滤波.

(3) 将滤波后的高分辨率影像进行  $W$  进制小波变换, 得到一个低频成分和  $W^2 - 1$  个高频分量组成的变换影像.

(4) 进行影像数据融合

设  $R(x, y)$  为融合后的影像数据,  $A(x, y)$  为高分辨率影像的变换影像的低频成分数据,  $B(x, y)$  为低分辨率影像数据. 由于影像的特征与影像方差有着密切的联系, 所以可根据下式确定融合后的数据:

$$R(x, y) = \begin{cases} B(x, y) & \text{高分辨率影像低频成分上} \\ & (x, y) \text{ 周围的方差小于低频} \\ & \text{成分影像上} \\ A(x, y) & \text{高分辨率影像低频成分上} \\ & (x, y) \text{ 周围的方差大于低频} \\ & \text{成分影像上} \end{cases}$$

(5) 将  $R(x, y)$  和高分辨率影像的变换影像的

高频成分经过  $W$  进制小波逆变换, 得到融合后的高分辨率影像.

以上融合过程如图 1 所示.

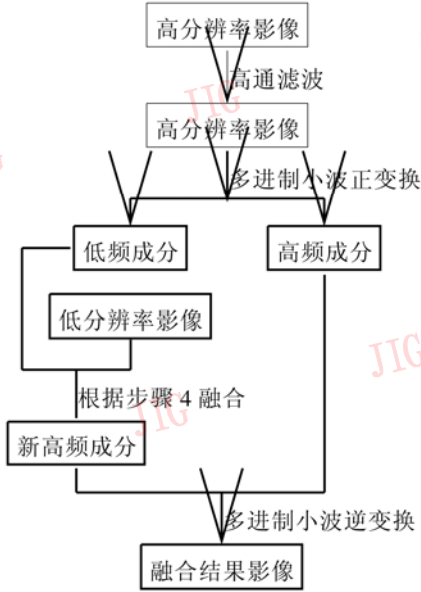


图 1 基于多进制小波的多源遥感影像融合

### 3 实验结果及讨论

为了验证方法的正确性和优越性, 选择了某地区

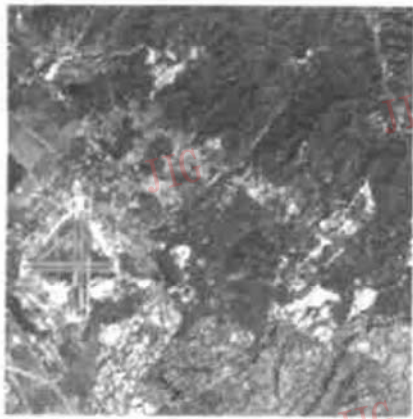


图 2 原图

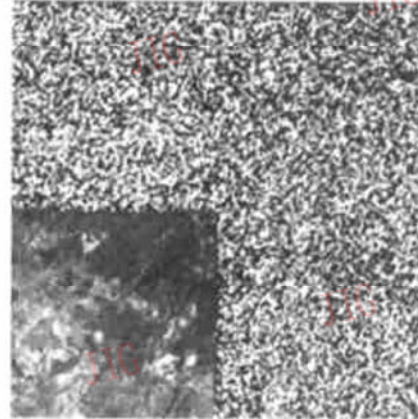


图 3 二进制小波分解图

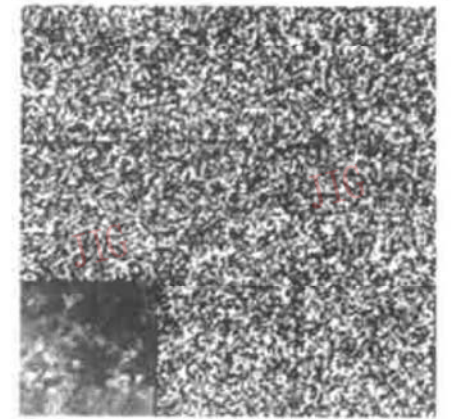


图 4 三进制小波分解图

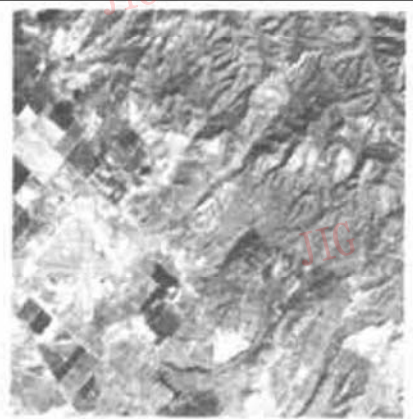


图 5 TM5 影像

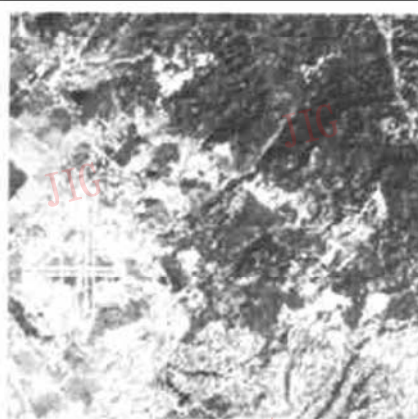


图 6 融合影像 1

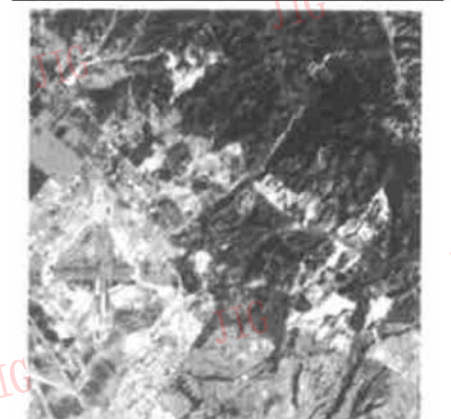


图 7 融合影像 2

的 SPOT 全色影像(分辨率为 10m)和 SPOT 多光谱影像(地面分辨率为 20m)与该区域的 TM5 波段影像(分辨率为 30m), 分别进行融合实验, 首先对这些影像分别进行几何配准. 表 2 分别列出了 SPOT 全色影像与相应的 SPOT 多光谱影像以及 SPOT 全色影像与相应的 TM 影像的配准精度.

表 2 影像配准精度

单位: pixel

配准影像	X 方向精度	Y 方向精度	XY 方向精度	控制点及 直线段数
全色影像和多光谱影像	0.28	0.25	0.38	6 4
全色影像和 TM 影像	0.40	0.38	0.55	6 5

图 2 为原图, 图 3、4 分别为图 2 的二进制和三进制小波分解图. 图 5 为同一地区的 TM 影像, 图 6 为原图与同地区的 SPOT 多光谱影像(地面分辨率为 20m) 的融合影像图, 图 7 为原图与同地区的 TM5 波段的影像(地面分辨率为 30m) 融合影像.

由图可见, 融合后的影像很好地融合了待融合影像的特性, 在空间分辨率和光谱分辨率方面比原始影像有了明显的提高.

利用熵、联合熵和平均梯度的方法<sup>[9]</sup>来评价融合影像的信息和清晰度. 利用不同方法进行 SPOT 全色影像与相应的 TM 影像融合后的影像的熵、联合熵和平均梯度如表 3.

表 3 融合影像的熵、联合熵和平均梯度

融合方法	融合影像分量	熵 $H(X)$	联合熵 $H(X_1X_2X_3)$	平均梯度
HIS 变换法	$X_1$	5.40	14.86	6.25
	$X_2$	5.40		6.44
	$X_3$	5.60		6.82
文献[2]方法	$X_1$	6.30	16.12	7.69
	$X_2$	6.32		7.84
	$X_3$	6.53		7.92
本文方法	$X_1$	6.60	16.83	8.17
	$X_2$	6.64		8.30
	$X_3$	6.80		8.62

从表 3 可以看出, 用本文方法进行融合后的影像在熵、联合熵和平均梯度上, 比其他方法具有较大的优势, 融合后的影像在信息量、清晰度和可判读性上都有比较明显的优势. 该方法已经成功地应用于遥感影像信息处理系统中.

参 考 文 献

- 1 Chavez P S Jr, Sides S C, Anderson J A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57(3): 295~ 303.
- 2 Sheffigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(5): 561~ 567.
- 3 Yéson H, Besnus Y, Polet J. Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery—a contribution to be study of geological structures[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1993, 48(5): 23~ 36.

- 4 BROUD G D, JACKY G, JEAN M C *et al.* The use of multi-resolution analyse and wavelet transform for merging SPOT panchromatic and multiSpectral image data[J]. PE&RS, 1996, 25(9): 340~ 352.
- 5 朱长青, 王倩, 杨晓梅. 基于多进制小波的 SPOT 全色影像和多光谱遥感影像融合[J]. 测绘学报, 2000, 29(5): 43~ 47.
- 6 李军, 林宗坚. 基于特征的遥感影像数据融合方法[J]. 中国图象图形学报, 1997, 2(2): 103~ 107.
- 7 孙顾或. 多进制小波的构造[R]. 浙江大学数学所报告, 1996.
- 8 赵琪. 基于多源空间信息的定位模型研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 1999: 110~ 113.
- 9 贾永红, 李德仁. 基于像元的遥感影像融合方法的比较[J]. 测绘信息与工程, 1997, 4(4): 23~ 26.



王洪华 1976 年生, 1998 年获得解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程学士学位, 现为该系硕士研究生. 主要研究方向为遥感影像处理、地理信息系统.



王双亭 解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系副教授. 主要研究方向为遥感影像处理、数据库系统.



杜春萍 大连市黑石礁 65015 部队 4 队助理工程师. 主要研究方向为数字摄影测量.